

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА В УСЛОВИЯХ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩЕЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Д. Дреннов

Институт Земной коры СО РАН, г. Иркутск

В статье приводятся данные анализа сейсмических воздействий при сильных землетрясениях для территорий, расположенных в различных климатических зонах Сибири и северо-востока Азии. Выявленные преобладающие направления в изменении макросейсмических проявлений в наглядной форме подтверждают различную степень затухания балльности с расстоянием для зон сплошной и островной мерзлоты. По результатам экспериментальных исследований построены физико-геологические модели, характеризующие наиболее вероятные типы приповерхностных и глубинных неоднородностей криолитозоны. Оценено их влияние на исходные сейсмические сигналы в процессе возможного изменения температуры и деградации мерзлоты под воздействием искусственных и техногенных факторов. На этой основе в первом приближении изучена динамика сейсмического риска при возможных температурных изменениях в криолитозоне.

Ключевые слова: динамика, сейсмический риск, криолитозона, акселерограмма, спектры, частоты, максимальные ускорения.

ВВЕДЕНИЕ

Общая площадь многолетней мерзлоты – криолитозоны Земли – составляет около 25% суши, а в России она занимает примерно 65% территории, на которой расположены важнейшие горнорудные, нефтяные, угольные и другие промышленные предприятия. Более половины площадей сейсмоактивных районов России приходится на область распространения вечной мерзлоты с различной степенью прерывистости, разной мощностью и температурой. На необходимость выделения в северном полушарии особой инженерно-сейсмогеокриологической области площадью порядка 10 млн км² указывал еще В.П. Солоненко в 1977 г. [15]. Это около 3,5 млн км² на территории России, а остальные – в Северной Америке (Канада, Аляска), северо-восточной Гренландии и на островах Северного Ледовитого океана. Отмечалось, что вечная мерзлота существенно усложняет районирование сейсмической опасности. Важнейшее значение при этом имеет правильный выбор и сочетание мерзлотных и сейсмических характеристик [3], однако учесть все разнообразие мерзлотных и геологических условий практически невозможно. Поэтому приходилось пользоваться грубой классификационной геокриологической схемой [16]. Дальнейшие исследования показали, что сейсмические свойства мерзлых грунтов не являются постоянными, "стабильными" в сейсмическом отношении коренные породы [19] в зависимости от внешних и внут-

ренних факторов также подвержены постоянным изменениям [3]. Все это потребовало проведения детальных исследований сейсмических свойств скальных грунтов различного состояния [4] и разработки новых методов прогноза сейсмических воздействий в условиях криолитозоны [7].

Риск есть мера опасности [19], в нашем случае она выражается в величинах вероятных сейсмических воздействий, которые представляются набором параметров, определяющих частоты, амплитуды и продолжительность сейсмических воздействий [2]. Одним из наиболее ответственных показателей является максимальное ускорение колебаний "почвы" при землетрясениях. Существуют специальные карты сейсмического риска, которые считаются вероятностными. Например, для территории США были составлены карты сейсмического риска, где ожидаемая интенсивность сотрясений выражается в значениях эффективного пикового ускорения, возникающего при землетрясениях на твердых грунтах [18]. Каждое указанное на карте значение ускорений с вероятностью примерно 90% не будет превзойдено в течение 50-летнего периода [1]. По такому же принципу составлены карты сейсмического районирования территории России в баллах [9]. Кроме указанных факторов при составлении любой карты сейсмического риска необходимо учитывать преобладающие периоды при сильных землетрясениях, резонансные частоты колебаний рыхлых грунтов, длитель-

ность колебаний и затухание [2] (уменьшение средней интенсивности колебаний с расстоянием от очага землетрясений).

В пределах сейсмокриолитозоны природные и техногенные факторы являются определяющими при изменении уровня сейсмического риска [21]. Поэтому, в итоге мы рассматриваем его оценку для двух возможных вариантов: естественного состояния мерзлых грунтов для определенной территории и на случай их деградации [23]. При этом основой для таких оценок является сравнительный анализ проявления сейсмичности при сильных землетрясениях в районах сплошного распространения мерзлых грунтов и в переходных зонах от мерзлых к талым.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Трудность анализа заключается в том, что в зонах сплошной и островной мерзлоты сейсмическая активность в одних и тех же местах в течение времени, установленного графиком повторяемости, не является непрерывной начиная со значений магнитуд от 4–5 и, тем более, достигающих 7–8. В этом случае статистические экстраполяции распространяются не на ограниченные участки, а на большие территории [20]. Поэтому проводимый нами анализ связи изосейст, температуры и сопутствующих им характеристик мерзлоты является генерализованным, но он, несомненно, будет представлять определенную ценность при переходе к более ограниченным территориям и при проектировании ответственных сооружений. На наш взгляд, необходимо показать, что

при оценке динамики сейсмического риска осваиваемых территорий криолитозоны важно знать в первую очередь сейсмичность территории, ее геологические и мерзлотные данные, и это является основой дальнейшего прогноза изменения параметров сейсмических воздействий в пределах эволюционирующей криолитозоны.

Анализ распределения уровня сейсмичности [9] и распространения мерзлоты на территории Восточной Сибири показывает, что границы этих зон практически не согласуются. Так, районы 7–9 балльных сотрясений вытянуты с запада на восток (рис. 1), а значения отрицательной температуры и мощность мерзлоты, в общем, уменьшаются с севера на юг и юго-восток. Эпицентры рассматриваемых нами землетрясений расположены в зоне сплошной мерзлоты, в пределах которой температура грунтов ниже минус 2°C, и островной ($t = 0-2^\circ\text{C}$). Для всего региона характерны значительные вариации как потенциальной сейсмической опасности, так и температурного поля грунтов. Это позволило изучать физические свойства слоев мерзлоты геофизическими методами в довольно широком диапазоне температур в естественном залегании и получать сравнительные характеристики их поведения при землетрясениях. Ниже кратко приводятся основные, имеющиеся и полученные нами, результаты исследований скоростей сейсмических волн в зависимости от состояния скальных и рыхлых грунтов, в том числе и с учетом глубины залегания слоев.

В характере изменения скоростей с глубиной отмечаются следующие особенности. В скальных

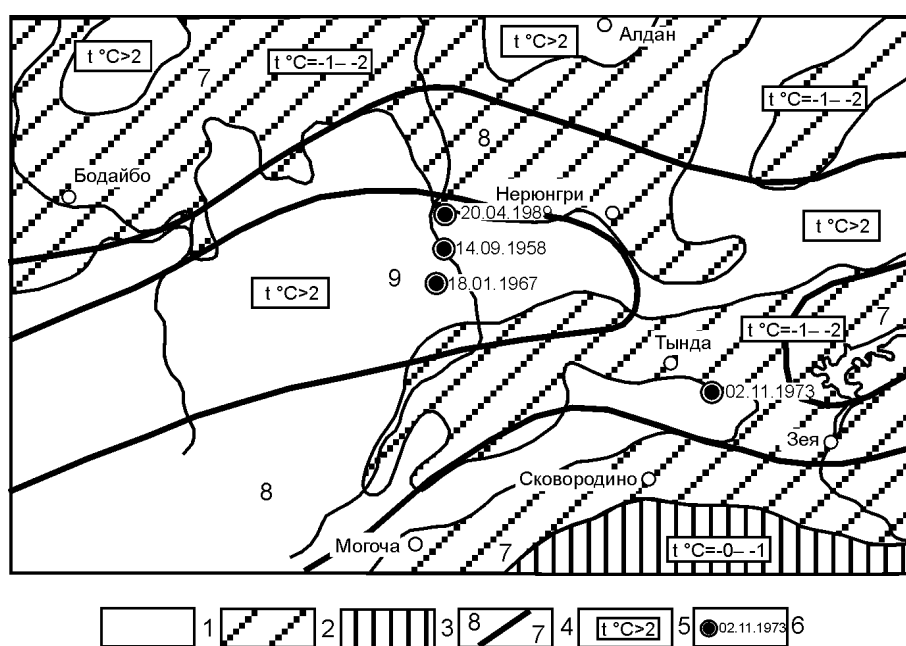


Рис. 1. Совмещенная схема мерзлотного и общего сейсмического районирования региона. 1–3 – районы распространения многолетнемерзлых грунтов: 1 – непрерывного, 2 – массивно-островного, 3 – островного; 4 – границы сейсмических районов; 5 – температура вечномерзлых грунтов; 6 – эпицентры сильных землетрясений.

грунтах наиболее вероятные значения скоростей в верхней зоне разреза увеличиваются при переходе от воздушно-сухого состояния к водонасыщенному и мерзлomu (V_p от 2,5 до 3,4 км/с и V_s от 1,1 до 1,7 км/с). С глубиной различия уменьшаются. Это свидетельствует о том, что наибольшим градиентом изменения V_p и V_s обладают воздушно-сухие и наименьшим – мерзлые грунты.

В воздушно-сухих песчаных и грубообломочных грунтах скорость Р- и S-волн увеличивается при изменении глубины от 2–3 до 30 м в 1,5–3 раза; в водонасыщенных интенсивность роста скоростей с глубиной снижается: V_p может увеличиваться в 1,2–1,4 раза, V_s – в 2 раза. В мерзлых грунтах скорости продольных и поперечных волн возрастают в пределах указанных глубин в 1,2–1,4 раза.

Приведенные данные свидетельствуют о закономерном повышении скоростей сейсмических волн, мощности мерзлоты и понижении ее температуры при переходе от южных районов к северным [5, 22], что не может не сказываться и на изменении параметров проявления сейсмичности. Это наглядно подтверждает и характер распределения изосейст сильных землетрясений. Соотношение магнитуды землетрясения, его интенсивности, выраженной в баллах, и вида изосейст неоднократно рассматривалось и ранее [20]. Исследователями отмечается ярко выраженная асимметрия изосейст отдельных землетрясений относительно эпицентра. Кроме того, они вытянуты либо в одном, либо в двух направлениях. Однако общая картина наложенных изосейст землетрясений при совмещении их эпицентров выглядит довольно симметрично. Это позволило ввести средние соотношения [17], которые для землетрясений с $M=5,3-5,5$ характеризуют среднее спадание балльности от 6 до 5 и 4-х баллов с расстоянием от эпицентра 35, 90 и 190 км – соответственно.

Конкретное рассмотрение последствий сотрясений по площади для 4 сильных землетрясений, произошедших в последние 50 лет, приводят к несколько другим результатам. Эпицентры выбранных землетрясений расположены в зоне сплошной мерзлоты и в переходной от сплошной к островной мерзлоте (рис. 1). Их основные характеристики следующие: Тас-Юряхское землетрясение 18.01.1967 г. (9–10 баллов, $M=7$, ощущалось на площади 1,3 млн км² и на расстоянии более 1100 км от эпицентра) [16]; Южно-Якутское землетрясение 20.04.1989 г. (8 баллов, $M=6,6$, ощущалось на площади 1,2 млн км² и на расстоянии более 800 км от эпицентра) [12]; Олекминское землетрясение 14.09.1958 г. ($M=6,5$, эпицентр расположен на крайнем востоке Олекмо-Витимской горной страны в бассейне среднего течения р. Олек-

мы [8], площадь ощутимого потрясения оценивается в 450–500 тыс. км²); Зейское землетрясение 02.11.1973 г. ($M=5,7$, эпицентр расположен в Зейском районе Амурской области, интенсивность в эпицентре 8 баллов [11], общая площадь, на которой ощущалось землетрясение, свыше 100 тыс. км²). Олекминское землетрясение в отличие от других приведенных произошло в условиях сглаженного рельефа, характеризующегося слабой дифференциацией неотектонических движений.

Выделенные по изосейстам преобладающие максимальные и минимальные направления макросейсмических проявлений в наглядной форме подтверждают различную степень затухания балльности с расстоянием для зон сплошной и островной мерзлоты (рис. 2). Для Тас-Юряхского и Южно-Якутского землетрясений, если брать северное направление (Алдан) и южное (Чита, Благовещенск), затухание балльности различаются в 1,5–2 раза. В первом случае (северное направление) среднее спадание балльности от 6 до 5 и 4-х баллов отмечается на расстояниях от эпицентра – 80, 150 и 240 км, во втором (южное направление) – 110, 310 и 580 км, соответственно.

Зейское и Олекминское землетрясения расположены в более сложных сейсмокриологических условиях (рис. 2), однако отмеченные особенности распределения преобладающих направлений интенсивности землетрясений сохраняются. В южном направлении для Зейского землетрясения спадание балльности от 7, 6, 5 и до 4-х баллов отмечается на расстоянии 80, 120, 200 и 260 км; в направлении распространения сплошной мерзлоты, северное направление – 20, 40, 100 и 160 км, соответственно. Для Олекминского землетрясения, магнитуда которого на единицу превышает предыдущее, спадание балльности в направлении развития островной мерзлоты (юго-восток) и преобладания талых пород (для отмеченных выше значений балльности) характеризуется следующими расстояниями: 140, 200, 300, и 700 км. Для территорий развития твердомерзлых пород (северное направление) – 60, 120, 180 и 340 км, соответственно.

В рассматриваемом регионе преобладающее направление основных разломов и геологических структур близко к направлению с запада на восток, к которому, несомненно, должны тяготеть и максимальные проявления интенсивности сотрясений. В какой-то степени, для Зейского землетрясения это подтверждается, и, в то же время, явно прослеживается понижение затухания интенсивности сотрясений в южном направлении, что может быть связано и с увеличением влияния физического состояния приповерхностной части земной коры на величину сей-

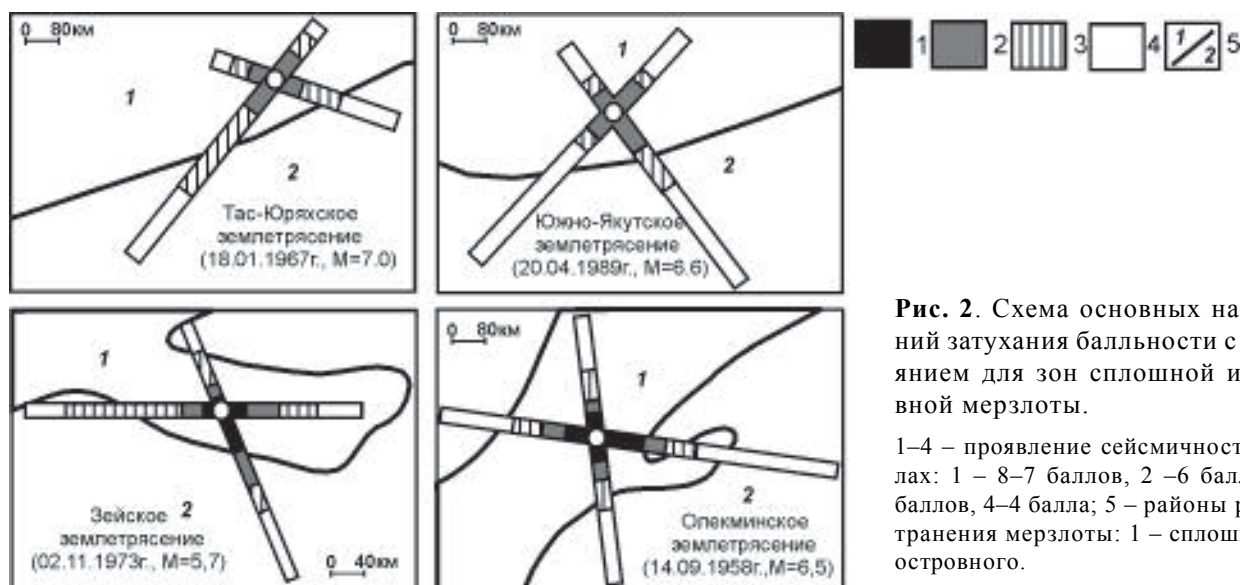


Рис. 2. Схема основных направлений затухания балльности с расстоянием для зон сплошной и островной мерзлоты.

1–4 – проявление сейсмичности в баллах: 1 – 8–7 баллов, 2 – 6 баллов, 3–5 баллов, 4 – 4 балла; 5 – районы распространения мерзлоты: 1 – сплошной, 2 – островной.

смических воздействий. Однако это существенно для изосейст <5–6 баллов. Их характер при сейсмичности >7 баллов для всех рассмотренных землетрясений определяется в основном силой землетрясения, глубиной очага и его механизмом. Но и в этих зонах встречаются участки, расположенные на одинаковом расстоянии от эпицентра и с различной степенью проявления сейсмичности, достигающей одного балла, что требует детального изучения физических свойств мерзлоты в основаниях исследуемых сооружений.

Сформулированные, при использовании приведенных выше примеров, особенности проявления сейсмичности могут являться основой изучения пространственно-временной неоднородности поведения криолитозоны при температурных, техногенных и сейсмических нагрузках.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РИСКА В ПЕРЕХОДНЫХ ЗОНАХ ОТ МЕРЗЛЫХ ПОРОД К ТАЛЫМ

Для количественной оценки влияния приповерхностной части земной коры на исходные сейсмические сигналы проведены теоретические расчеты акселерограмм, спектров ускорений и собственных частотных характеристик. Изменения указанных характеристик при полной или частичной деградации мерзлоты будут отражать динамику сейсмического риска. Проследить такие изменения возможно путем построения набора динамических физико-геологических моделей для переходных зон от сплошной мерзлоты к талым грунтам и проведения необходимых расчетов степени изменения исходных сигналов верхней частью земной коры, представленной указанными моделями.

Для реализации такого подхода был выбран метод тонкослоистых сред [13]. Решалась двумерная задача для плоской объемной волны, падающей под различными углами на подошву нижнего слоя. В расчетном алгоритме используется линейная теория упругости, моделирующая слабые сейсмические воздействия. Прямое применение результатов расчета справедливо при сравнительно слабой исходной сейсмичности (до 7 баллов), однако по расчетным максимальным ускорениям, превышающим 7-ми балльные сотрясения, возможно прогнозировать остаточные деформации с определенной достоверностью [13].

В связи с решением поставленной задачи, на первом этапе были построены три сейсмические модели до глубин возникновения землетрясений. Они характеризуются изменением с глубиной акустических жесткостей, скоростей продольных и поперечных волн и декрементов их затухания. Модели соответствуют геологическим разрезам северо-восточной части Байкальской сейсмической зоны (БСЗ) (в пределах криолитозоны – для мерзлых грунтов и для талых – с различной мощностью рыхлых отложений). Это могут быть районы эпицентральных зон рассматриваемых землетрясений в средних и южных районах Восточной Сибири. Верхняя часть разреза нами достаточно надежно изучена в скоростном отношении [7], и обобщающие данные приведены в предыдущем разделе. В нижележащих слоях значения скоростей P- и S-волн взяты по данным, приведенным в работах [10, 14]. Декременты поглощения оценены по скоростям поперечных волн в соответствии с методикой, изложенной в работе [13]. Параметры сейсмических моделей представлены в табличной форме (табл.).

Таблица. Параметры сейсмических моделей верхней части земной коры.

| № модели | Скорость P- волн (км/с) | Скорость S- волн (км/с) | Мощность слоя (км) | Объемная масса (г/см ³) | Декремент поглощения |
|----------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 3,4 | 2,0 | 0,01 | 2,2 | 0,027 |
| | 4,8 | 2,8 | 0,325 | 2,5 | 0,025 |
| | 5,8 | 3,5 | 2,65 | 2,7 | 0,023 |
| | 6,0 | 3,6 | 3,0 | 2,8 | 0,02 |
| | 6,2 | 3,7 | 3,0 | 2,9 | 0,018 |
| | 6,4 | 3,8 | 3,0 | 3,0 | 0,016 |
| | 7,0 | 3,95 | 5 | 3,2 | 0,014 |
| | 7,6 | 4,5 | ∞ | 3,4 | 0,013 |
| 2 | 0,8 | 0,35 | 0,01 | 1,8 | 0,2 |
| | 0,97 | 0,45 | 0,01 | 1,9 | 0,17 |
| | 2,6 | 1,3 | 0,06 | 2,5 | 0,05 |
| | 3,4 | 2,0 | 0,01 | 2,55 | 0,035 |
| | 4,8 | 2,9 | 0,325 | 2,6 | 0,025 |
| | 5,8 | 3,5 | 2,65 | 2,7 | 0,023 |
| | 6,0 | 3,6 | 3,0 | 2,8 | 0,02 |
| | 6,2 | 3,7 | 3,0 | 2,9 | 0,018 |
| | 6,4 | 3,8 | 3,0 | 3,9 | 0,016 |
| | 7,0 | 3,95 | 5 | 3,2 | 0,014 |
| | 7,6 | 4,5 | ∞ | 3,4 | 0,013 |
| | 3 | 0,9 | 0,45 | 0,10 | 1,9 |
| 1,1 | | 0,55 | 0,2 | 2,0 | 0,16 |
| 2,6 | | 1,4 | 0,1 | 2,5 | 0,05 |
| 3,4 | | 2,0 | 0,01 | 2,55 | 0,035 |
| 4,8 | | 2,9 | 0,325 | 2,6 | 0,025 |
| 5,8 | | 3,5 | 2,65 | 2,7 | 0,023 |
| 6,0 | | 3,6 | 3,0 | 2,8 | 0,02 |
| 6,2 | | 3,7 | 3,0 | 2,9 | 0,018 |
| 6,4 | | 3,8 | 3,0 | 3,9 | 0,016 |
| 7,0 | | 3,95 | 5 | 3,2 | 0,014 |
| 7,6 | | 4,5 | ∞ | 3,4 | 0,013 |

В региональном плане первая модель построена для северных районов, охваченных мерзлотой (Чарская впадина). В ее пределах в самой верхней зоне разреза скорости сейсмических волн имеют высокие значения, равные 3,2–3,6 км/с – для продольных и 1,6–1,9 км/с – для поперечных волн. На первых десятках метров они быстро возрастают до 4,8 и 2,8 км/с, соответственно. Далее до глубины 18 км разрез представлен шестью слоями со значениями $V_p=5,8; 6,0; 6,2; 6,4; 7$ и $7,6$ км/с.

Вторая модель соответствует талым грунтам, она представляется 11-ю слоями. В рыхлых неводонасыщенных грунтах средняя скорость P-волн в верхнем 10-ти метровом слое равна 0,8 км/с, а $V_s=0,35$ км/с. На участках выхода коренных пород на поверхность скорость продольных волн в слое мощностью 70 метров увеличивается от 2,6 до 4,8 км/с, а V_s – от 1,3 до 2,9 км/с. Ниже, до глубины 18 км, распределение скоростей соответствует предыдущей сейсми-

ческой модели. Эта модель представляет предгорные районы и участки конусов выноса.

Третья модель, характеризуется увеличением мощности рыхлых талых грунтов до 300–500 м и соответствует обширным территориям, занимаемым речными долинами и впадинами Байкальского типа. Составленные модели имеют ряд неопределенностей в значениях скоростей P- и S-волн, мощностях промежуточных слоев и объемном весе пород. Однако они основаны на большом экспериментальном материале, статистическом анализе имеющихся данных, на сведениях о физическом строении земных недр Сибири и Дальнего Востока и могут в дальнейшем уточняться или детализироваться в соответствии с местными условиями.

В качестве исходного сигнала была сформирована акселерограмма для горизонтальной компоненты по методике, изложенной в работах [6, 7], с относительно широкополосным спектром, соответствующим приведенным выше сильным землетрясениям [8, 11, 12]. Продолжительность сигнала составила 20 с, максимум спектра приходится на 1–2 Гц, ширина спектра, на уровне 0,5 от максимума, лежит в интервале 0,7–5,5 Гц. По отмеченным параметрам, частотному и амплитудному составу такой сигнал может соответствовать большому числу возможных сильных землетрясений исследуемого региона.

Расчеты выполнены для горизонтальной составляющей сейсмического сигнала. Они иллюстрируют обусловленную природными и техногенными факторами относительную степень его изменения верхней частью земной коры в переходной области, от мерзлых горных пород к талым. Проанализируем кратко полученные результаты.

Модель 1, мерзлые грунты. Степень изменения исходного сигнала в зависимости от частоты показывает частотная характеристика 18-ти километровой толщи (рис 3, U-1). Наибольшие усиления в 1,5–2,4 раза приходятся на периоды 0,5–2 Гц. Спектр имеет основные максимумы на частотах 1,5–3,5 Гц (рис. 3, S-1), а максимальное ускорение, соответствующее твердомерзлым и коренным породам, равно 130 см/с^2 . Эти величины не привязаны конкретно к определенному району, но они по своим значениям соответствуют 7-ми балльному сейсмическому воздействию на твердых грунтах. В дальнейшем, при сравнительном анализе проявлений сейсмичности для районов, представляемых следующими двумя моделями, они приняты как "эталонные".

Модель 2 (сверху до 80 м – талые рыхлые и трещиноватые скальные грунты) соответствует модели 1

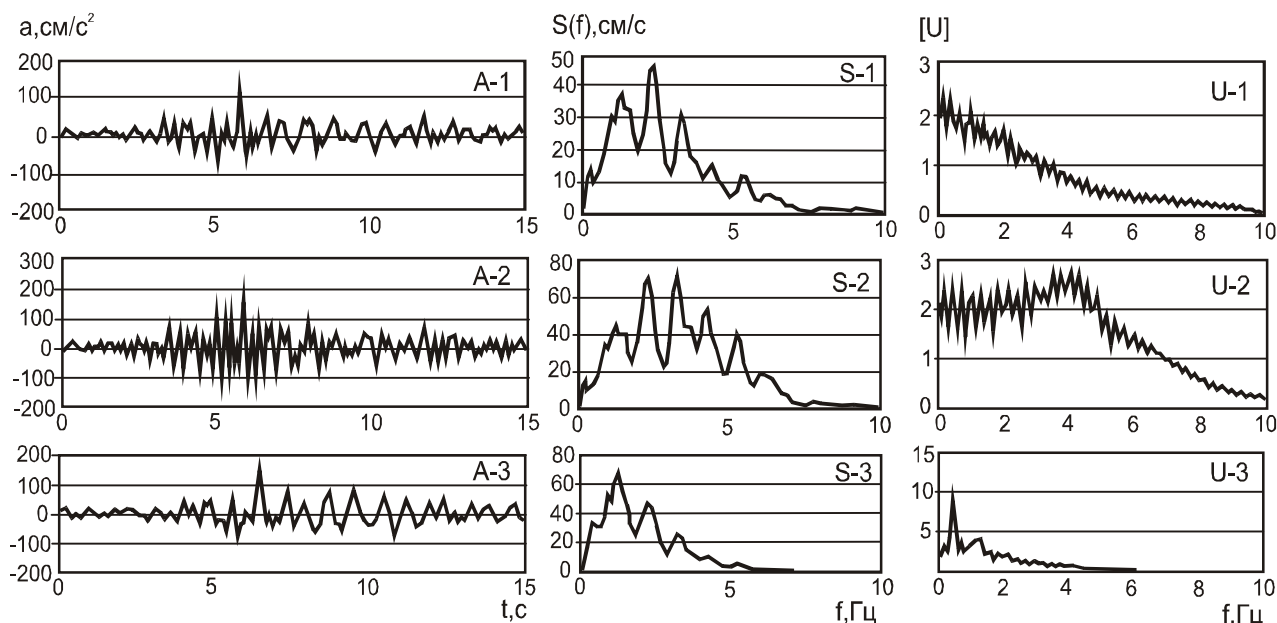


Рис. 3. Вероятные сейсмические характеристики сильных землетрясений в переходных климатических зонах.

Пояснения в тексте.

(мерзлые грунты) начиная с четвертого слоя. Эти изменения приводят к увеличению максимальных ускорений в 1,85 раза (до 240 см/с²) (рис. 3, A-2) и максимума спектра – в 1,6 раза. Ширина спектра на уровне 0,5 от максимума меняется в несколько больших пределах по сравнению с исходным сигналом, от 1,7 до 5,2 Гц. Длительность колебаний с амплитудами 0,5 от максимума увеличилась практически в 2 раза (рис. 3, S-2, A-2). Существенным является изменение формы частотной характеристики, она в интервале частот от 3,5 до 4,5 Гц имеет максимум, равный 2,9 (U-2). Это свидетельствует о значительном увеличении интенсивности колебаний исходного сигнала приповерхностной частью оттаявших грунтов на относительно высоких частотах.

Модель 3 (талые грунты, соответствует модели 1 начиная с 300 метрового слоя) приводит к следующим изменениям параметров исходного сигнала. Максимум ускорений несколько снижается (до 190 см/с²) по сравнению с моделью 2, но они приходятся на более низкие частоты. То есть произошло снижение интенсивности колебаний исходного сигнала на относительно высоких частотах (3–4 Гц) и увеличение на относительно низких (1,5–2 Гц). Это хорошо подтверждается расчетной акселерограммой (рис. 3, A-3), спектром (рис. 3, S-3), и частотной характеристикой (рис. 3, U-3). В последнем случае на частотах, близких к одному герцу, можно ожидать усиления исходного сигнала в 9 раз.

Для оценки и разделения степени влияния глубинных и приповерхностных неоднородностей на исходный сигнал использовались частотные характеристики [7, 13]. Суммарное влияние для построенных моделей найдено путем деления спектров сейсмических колебаний на поверхности на спектр исходной акселерограммы. Они показывают, что модель, представленная сверху мерзлыми и плотными грунтами, увеличивает длиннопериодные колебания на частотах меньше 2–3 Гц. С увеличением частоты наблюдается быстрый спад кривой (рис. 3. U-1). Для талых грунтов (рис. 3. U-2) происходит заметное увеличение (в 2–3 раза) интенсивности исходных колебаний на частоте от 2 до 5 Гц. Поэтому величины отношений этих кривых будут иметь максимум, равный 3,2 на низких частотах (близких к 1 Гц) и 5,4 на частотах, близких к 2 Гц. Это свидетельствует о возрастании степени влияния приповерхностных неоднородностей на величину изменений амплитудного и частотного состава колебаний исходного сигнала при переходе от территорий с твердомерзлыми грунтами к территориям распространения островной мерзлоты, что подтверждается отмеченным выше распределением изосейст сильных землетрясений (рис. 2).

Непосредственно проследить динамику интенсивности сейсмических колебаний на определенных частотах при переходе от северных районов к южным возможно по относительным частотным характеристикам. Переход к южным предгорным участкам

или оттаивание верхнего слоя рыхлых грунтов мощностью 20 м и зоны выветривания до 60 м приводят к увеличению интенсивности колебаний исходного сигнала на частотах 4–8 Гц в 2–4 раза (рис. 4; ряд 2/1). Низкочастотные колебания по величине амплитуд на частотах до 2 Гц практически не меняются.

Если рассматривать центральные части южных впадин с мощностью талых грунтов до 200–300 м или деградацию мерзлоты указанной мощности, то можно ожидать относительное усиление колебаний на частотах 0,5–1,5 Гц в 2–4,5 раза (рис. 4; ряд 3/1). Относительное увеличение интенсивности колебаний в зависимости от частоты с возрастанием мощности рыхлых кайнозойских отложений от 20 до 300 м показывает частотная характеристика 3/2 (рис. 4). При этом, наибольшие усиления в 3–4 раза приходятся на частоту 0,4–0,6 Гц.

Таким образом, путем построения набора моделей изучена в первом приближении динамика сейсмического риска территорий, расположенных в зонах сплошной и островной мерзлоты. При изучении использовались макросейсмические сведения по сильным землетрясениям и исходный сигнал, соответствующий 7-ми балльному воздействию для твердых

пород. В результате получен набор параметров, характеризующих изменение сейсмического риска при одинаковых сейсмических воздействиях (7 баллов для твердых грунтов) в случае деградации мерзлоты определенной мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявление влияния природно-техногенных факторов на величину сейсмических воздействий в пределах криолитозоны связано с решением многих задач сейсмоки криолитозоны, направленных на разработку единой методики районирования сейсмической опасности территорий, охваченных мерзлотой. В этом отношении представляет интерес оценка влияния степени изменения среды, в которой распространяются сейсмические волны, на величину их динамических характеристик.

Основные параметры неоднородностей горных пород в пределах верхней части литосферы определяются их состоянием, составом, слоистостью, трещиноватостью и объемной массой. Две последние характеристики неоднородностей в большинстве случаев уменьшаются с увеличением глубины. Исключения составляют различного рода включения, волноводы и резкие границы раздела типа Мохо. Все это оказывает существенное влияние на амплитудный и частотный состав сейсмических колебаний и должно учитываться при районировании сейсмической опасности. В таком направлении и представлены результаты исследований влияния природно-техногенных факторов на величину сейсмических воздействий в пределах криолитозоны. Они основаны на проведении комплексных геофизических измерений в различных (по мерзлотным особенностям) районах и сравнении сейсмических характеристик горных пород различного состояния. Теоретические расчеты и макросейсмические данные по сильным землетрясениям показывают значительную изменчивость влияния верхних слоев грунтовых отложений на интенсивность и частотный состав землетрясений. Для районов с твердомерзлыми грунтами большой мощности основные изменения исходного сигнала можно ожидать на относительно низких частотах. Переход к южным районам или деградация мерзлоты малой мощности приводят к усилению влияния приповерхностных неоднородностей, которые становятся значительными (сравнимыми с глубинными) на частотах сейсмических колебаний больше 3 Гц.

Увеличение мощности рыхлых отложений до 300 м или деградация мерзлоты такой мощности приводит к появлению в спектре сейсмических колебаний резонансных максимумов на низких частотах, наиболее опасных для зданий и сооружений, что и

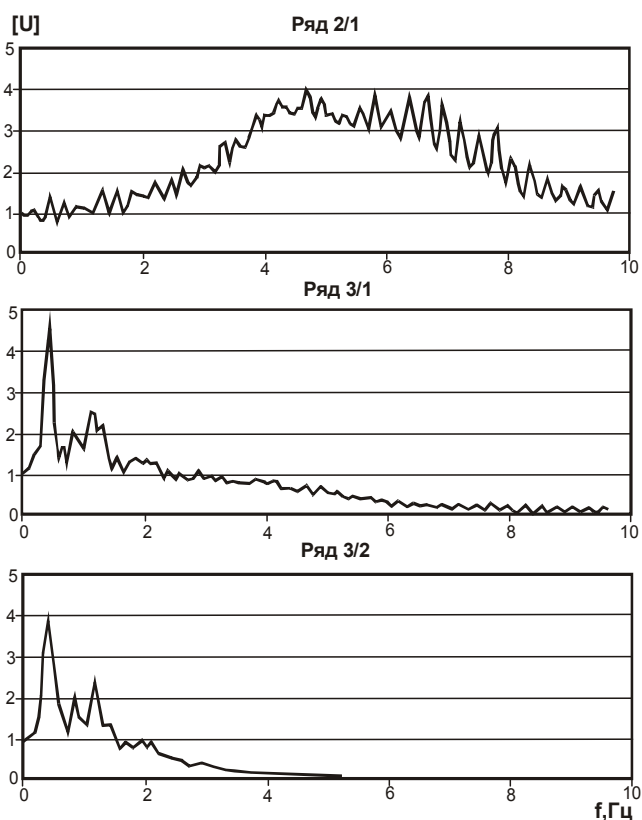


Рис. 4. Относительные частотные характеристики верхних пачек слоев земной коры.

Пояснения в тексте.

отмечается по макросейсмическим данным. Тем самым, для решения методических задач районирования сейсмической опасности и изучения динамики сейсмического риска в пределах эволюционирующей криолитозоны выявлена необходимость наиболее углубленного анализа сейсмологических и геофизических данных, полученных в районах с различными мерзлотными условиями, расширения сети режимных инженерно-сейсмологических измерений и использования данных проявления сильных землетрясений.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ проекта № 04-05-64376.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болт Б. Землетрясения. М.: Мир, 1981. 254 с.
2. Винсон Т. С. Мерзлые грунты под динамическими нагрузками // Геотехнические вопросы освоения Севера / Пер. с англ. М., 1983. С. 401–488.
3. Джурик В.И. Динамика сейсмических свойств скальных грунтов // Геологические и экологические прогнозы. Новосибирск: Наука, 1984. С. 26–35.
4. Джурик В.И., Дреннов А.Д., Иванов Ф.И., Потапов В.А. Сейсмические свойства скальных грунтов. Новосибирск: Наука, 1986. 137 с.
5. Джурик В.И., Дреннов А.Д. Влияние глубинных и приповерхностных неоднородностей на динамику сейсмических сигналов // Геология и геофизика. М.: Наука, 1991. С. 98–108.
6. Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д. Влияние неоднородных слоистых сред верхней части земной коры на динамику сейсмических сигналов // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 6. С. 3–12.
7. Джурик В.И., Дреннов А.Д., Басов А.Д. Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 272 с.
8. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. М.: Наука, 1966. 230 с.
9. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации, ОСР-97: Объясн. зап. и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: РАН, 1999. 57 с.
10. Недра Байкала по сейсмическим данным. Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.
11. Николаев В.В., Семенов Р.М., Солоненко В.П. Сейсмогеология Монголо-Охотского линеймента (восточный фланг). Новосибирск: Наука, 1979. 110 с.
12. Николаев В.В., Голенецкий С.И., Серебренников С.П. Геологические условия возникновения и макросейсмические проявления Южно-Якутского землетрясения 20 (21) апреля 1989 г. // Геология и геофизика. 1991. №12. С. 110–118.
13. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. 224 с.
14. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1997. 300 с.
15. Солоненко В.П. Особенности сейсмических проявлений в условиях вечной мерзлоты // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск: Наука, 1977. С. 279–284.
16. Солоненко В.П. Сейсмогеологические условия зоны строительства БАМ: Оперативная информация: Иркутск, 1981. 49 с.
17. Солоненко А.В., Кочетков В.М. Энергетическая классификация землетрясений // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск: Наука, 1997. С. 79–92.
18. Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. 374 с.
19. Сейсмическое микрорайонирование в условиях вечной мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1975. 90 с.
20. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Отв. ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1997. 306 с.
21. Управление риском. Риск, устойчивое развитие синергетика. М.: Наука, 2000. 429 с.
22. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. М.: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
23. Якупов В.С., Ахметшин А.А., Калинин В.М. Оценка времени деградации мерзлой толщи на некоторых участках Хапчгайского мегавала // Тез. Докл. Междунар. Симпоз. Ч. 2: "Четвертичные события стратиграфия Евразии и Тихоокеанского региона". Якутск, 1990. С. 85–86.

Поступила в редакцию 15 сентября 2003 г.

Рекомендована к печати Н.П. Романовским

V.I. Dzhurik, S.P. Serebrennikov, A.D. Drennov

The study of dynamics of seismic risk in conditions of the evolving cryolite zone

Data on the analysis of seismic effects during large earthquakes are offered for the territories located in different climatic zones of Siberia and northeastern Asia. The trends dominating the change of macroseismic development are indicative of the fact that damping of seismic intensity with distance is different for continuous and insular permafrost zones. Physical and geological models characterizing the most probable types of near-surface and deep-seated inhomogeneities of the cryolite zone are constructed based on experimental research data. Their influence on the initial seismic signals is determined in the course of probable temperature variations and permafrost degradation under the effect of simulated and man-made factors. As a first approximation, the dynamics of seismic risk at probable temperature variations in the cryolite zone is studied based on this determination.